

基质吸力对花岗岩残积土强度影响分析

谢秀栋¹,邱文杰¹,郭国林²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省水利水电科学研究所, 福建 福州 350001)

摘要: 花岗岩残积土分布相当广泛,是工程建设中经常遇到的土体之一。借助非饱和三轴仪进行花岗岩残积土抗剪强度试验分析,探究基质吸力对其强度参数影响。试验结果表明基质吸力和净围压的增大对花岗岩残积土强度有提升作用,花岗岩残积土黏聚力随基质吸力增大呈线性增长趋势,内摩擦角随基质吸力增大呈曲线增长趋势。基质吸力对土体弹性模量的影响也是正相关的,即弹性模量随基质吸力增大呈递增规律。根据试验结果,得出抗剪强度参数与基质吸力的关系式及不同基质吸力下土体的弹性模量表达式。

关键词: 花岗岩残积土;基质吸力;抗剪强度;弹性模量

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0019—05

Influence of Matrix Suction on the Strength of Granite Residual Soil

XIE Xiudong¹, QIU Wenjie¹, GUO Guolin²

(1. College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Fuzhou, Fujian 350001, China)

Abstract: Granite residual soil is widely distributed, and is one of the soils often encountered in engineering construction. In this paper, the strength of granite residual soil strength is analyzed with the help of unsaturated triaxial apparatus, and the influence of matrix suction on its strength parameters is explored. The test results show that the increase of matrix suction and net confining pressure can improve the strength of granite residual soil. The cohesion of granite residual soil increases linearly with the increase of matrix suction, and the internal friction angle increases with the increase of matrix suction. The matrix suction also has an effect on the elastic modulus of the soil, and the elastic modulus increases with the matrix suction. According to the test results, the relationship between the shear strength parameter and the matrix suction and the expression of the elastic modulus of the soil under different matrix suction are obtained.

Keywords: granite residual soil; matrix suction; strength; modulus of elasticity

非饱和土的抗剪强度理论公式较多,如 Fredlund 的双变量公式^[1]、Bishop 公式^[2]、卢肇钧^[3]的吸附强度理论、缪林昌等^[4]提出的吸力强度的双曲模型等,但并没有广泛应用于实际工程的计算中,其主要原因是基质吸力的存在。基质吸力的存在是非饱和土区别于饱和土土力学理论的关键原因,近

年来,土体强度受基质吸力影响的研究受到许多学者的关注,郑方等^[5]和张景生^[6]对黄土进行抗剪强度试验,发现抗剪强度随基质吸力的增大而增大。文献[7-11]通过基质吸力对抗剪强度参数的影响进行试验研究,得出黏聚力随基质吸力的增大而增大,而基质吸力对内摩擦角影响不显著。邓署冬^[12]

对衡阳花岗岩残积土进行试验,得出初始基质吸力对内摩擦角和黏聚力的影响呈非线性。凌华等^[13]通过对砂质粉土、粉细砂和粉质黏土的研究,发现基质吸力对黏聚力和内摩擦角都有较大影响。韦锋等^[14]以非饱和和原状黄土及其重塑土为研究对象,进行了一系列的试验研究,拟合得出黏聚力和内摩擦角随吸力变化的公式,为工程中抗剪强度参数的选取提供了参考。由此可见,各学者的研究结果并不太一致,这主要受土类性质和试验方法等因素的影响。

在我国东南部,花岗岩分布相当广泛,尤其在湖南、江西、广东以及福建一带分布更为集中。花岗岩出露面积占陆地面积比例,在闽、粤两省可达到 30% ~ 40%^[5],花岗岩残积土厚度在闽粤沿海地区大都在 20 m ~ 35 m 之间^[3],在厦门地区最厚逾 70 m。因此,花岗岩残积土是闽东南沿海地区工程建设中经常遇到的主要土体之一。花岗岩残积土遇水易软化,强度指标变异性大,这会给工程带来不小的麻烦。

对此,本文拟采用非饱和三轴仪进行不同基质吸力下花岗岩残积土强度试验,探究基质吸力对花岗岩残积土强度影响,为实际工程提高参考。

1 研究方法

1.1 试验仪器简介

试验采用非饱和土应力应变控制式三轴仪,设备由压力室、加压系统、总体积测量系统和数据采集系统组成。压力室是内外双腔式,可同时施加相同的内外围压,避免内腔受高围压作用发生变形。孔隙气压力、孔隙水压力和围压由加压系统控制,轴压通过轴向剪切控制器施加。

1.2 试验方案

为研究基质吸力对非饱和花岗岩残积土抗剪强度参数和弹性模量的影响,共做 4 组控制基质吸力的固结排水剪切试样,1 组 3 个试样,共 12 个,每个试样控制干密度为 1.42 g/cm³,初始质量含水率为 24.2%。基质吸力设置四个梯度分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa 和 200 kPa,围压设三个梯度分别为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。

1.3 试验土样

试验用土是取自某地铁基坑的花岗岩残积土,将取来的土样进行常规土工试验,包括含水率试验、密度试验和颗粒筛分试验等。测得其物理指标参数见表 1,颗粒级配曲线见图 1。

表 1 花岗岩残积土基本物理指标

$w/\%$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	e	G_s
24.2	1.42	0.91	2.71

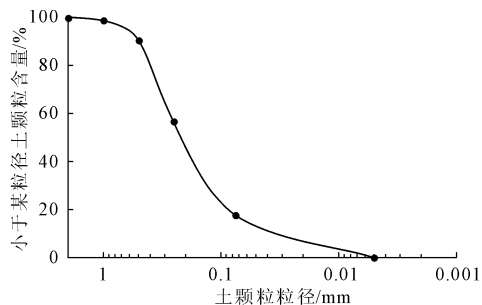


图 1 花岗岩残积土颗粒级配曲线

1.4 主要试验阶段

试验过程分为三个主要阶段,分别为基质吸力平衡阶段、等压固结阶段和匀速剪切阶段。

(1) 基质吸力平衡阶段。试样在设定基质吸力下,孔隙气与孔隙水均处于连通状态,孔隙气进入试样将孔隙水均匀缓慢排出。基质吸力是否达到平衡通过孔隙水体积的变化量来判断,以 24 h 内试样排水量不大于 0.1 cm³ 为平衡状态。基质吸力平衡之后,在整个试验过程中始终保持不变。

(2) 等压固结阶段。基质吸力达到平衡之后,开始对试样进行固结,在基质吸力保持不变情况下,通过施加一个净围压,使得试样在净围压作用下排水,并达到固结稳定。固结阶段是否完成同基质吸力平衡阶段一致,以 24 h 内孔隙水体积变化量小于 0.1 cm³ 为固结完成状态。

(3) 匀速剪切阶段。当基质吸力平衡和固结完成之后,试样在基质吸力和净围压不变情况下,进行排水剪切。为保证剪切过程中基质吸力保持不变,需要将陶土板透水速率和剪切速度加以考虑,剪切速率设置为 0.005 mm/min,设置剪切完成终止条件为轴向应变达到 15%。

2 试验结果分析

2.1 应力应变曲线

对非饱和三轴剪切试验的结果进行整理,若轴向压力出现峰值时则取峰值为最大主应力,若无峰值,则取轴向应变 $\varepsilon = 15\%$ 对应的轴向应力为最大主应力。

对同基质吸力不同围压下花岗岩残积土应力应变曲线进行分析。以轴向应变为横坐标,偏应力为纵坐标,绘制同基质吸力、不同净围压下应力应变曲线。

由图 2 应力应变曲线可以发现,开始剪切时偏应力随轴向应变的增大而迅速增大,轴向应变达到一定程度后,该变化速率趋于缓慢,强度逐渐趋于稳定。另外,试样的应力应变曲线大致呈现出应变硬化型,不存在明显的峰值点,应力随着应变的增加而增加。在同一基质吸力下的试样,随着净围压的增

大,应力应变曲线在图中位置上移,最大偏应力增大,这是由于土样在固结围压的作用下变得更加密实,土颗粒之间联接更加紧密,从而抵抗外力的能力变强,围压越大,增强效果越加显著,因此土体抗剪强度得到提升,相对来说,围压小的更加易于变形。

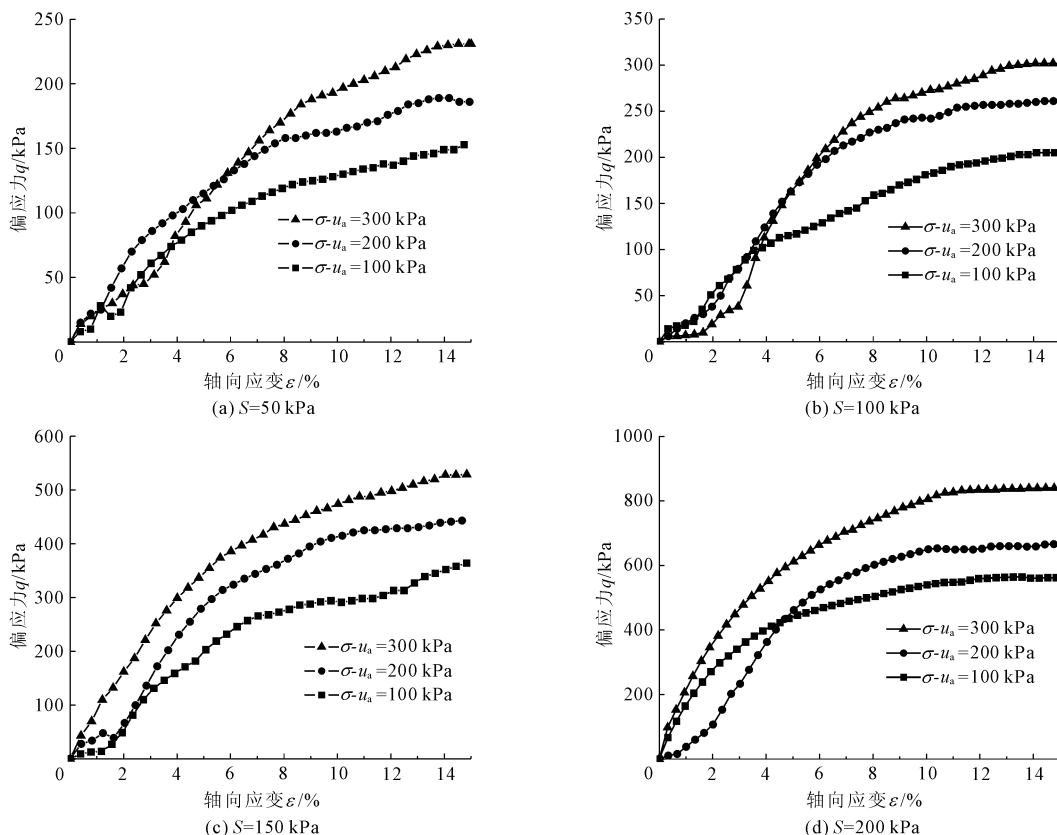


图 2 不同净围压下应力应变曲线

2.2 抗剪强度参数与变形参数分析

土体抗剪强度参数的两个重要指标分别为黏聚力(c)和内摩擦角(φ), c 值和 φ 值可通过强度包线的绘制来获得。以净法向应力为横坐标,剪应力为纵坐标,以 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 为圆心, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 为半径,在平面坐标系下绘制不同净围压下的应力圆,后作各圆的公切线,得到强度包线,包线在纵坐标上截距为黏聚力,倾角即为内摩擦角。试验所得各强度包线如图 3 所示。

土体弹性模量通过选取应力应变曲线直线段进行线性拟合^[15],得出的斜率值即为弹性模量 E_{SC} ,如图 4 所示。据此依次得出不同基质吸力和净围压下土体弹性模量。

表 3 给出了不同基质吸力下花岗岩残积土抗剪强度参数与弹性模量值,从表中数据可以看出不同基质吸力下土样的黏聚力和内摩擦角都不同,在一

定净围压作用下,均随着基质吸力的增加而增加。基质吸力和净围压对弹性模量均有影响,且基本随着净围压和基质吸力的增大而增大。

图 5 中图 5(a)和图 5(b)分别给出了花岗岩残积土抗剪强度参数值和值随基质吸力的变化趋势,弹性模量随基质吸力和净围压的变化趋势如图 6 所示。从图 5 可以看出,黏聚力随基质吸力的变化近似呈线性变化规律,内摩擦角随基质吸力的增大呈非线性增长,且在基质吸力大于 100 kPa 的情况下,增加速率明显提高。由图 6 可知,在同基质吸力不同净围压下,弹性模量大体是随着净围压的增大而增大。净围压一定的情况下,弹性模量随基质吸力的变化趋势大致相同,当基质吸力约小于 130 kPa 时,其弹性模量随基质吸力增大而缓慢增大,随后,呈现出大幅度增长的趋势。

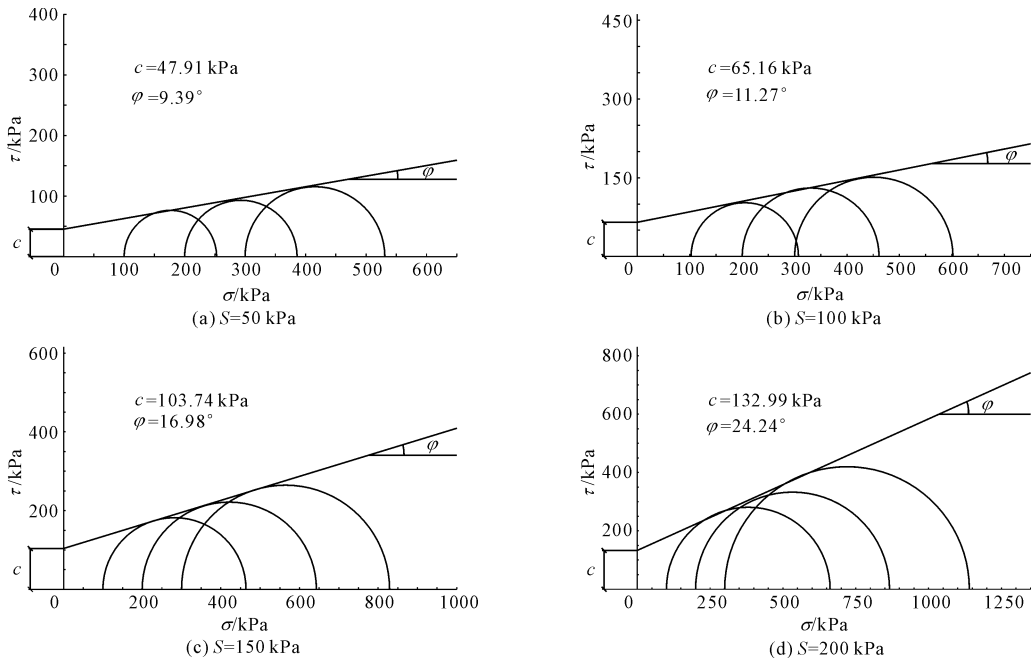


图 3 不同基质吸力下强度包线

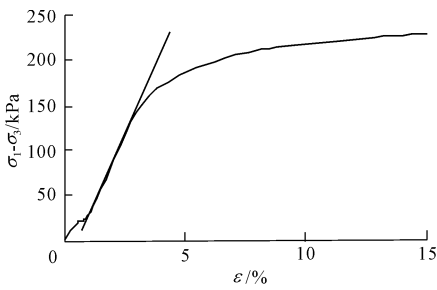
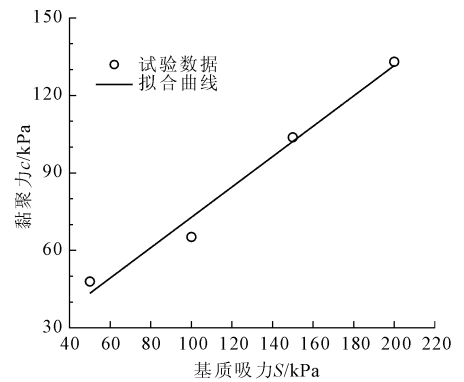


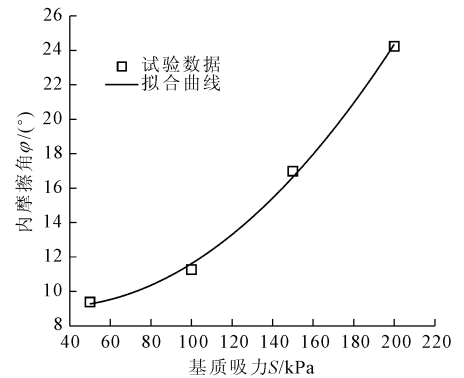
图 4 弹性模量取值示意图

表 3 不同基质吸力土样的强度参数

S/kPa	σ'_3 /kPa	$E_{SC}/10^2$ kPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
50	100	11.20		
	200	15.01	47.91	9.39
	300	20.38		
100	100	23.80		
	200	34.91	65.16	11.27
	300	32.75		
150	100	35.82		
	200	54.12	103.74	16.98
	300	60.77		
200	100	97.79		
	200	119.06	132.99	24.24
	300	134.18		



(a) 黏聚力与基质吸力的关系曲线



(b) 内摩擦角与基质吸力的关系曲线

图 5 基质吸力对抗剪强度参数的影响

$$c = 13.995 + 0.588S \quad (1)$$

$$\varphi = 4.99 + 2.459e^{\frac{S}{96.95}} \quad (2)$$

从图 5 中拟合曲线可以得出黏聚力、内摩擦角与基质吸力的关系式如下：

图 5 曲线与纵坐标的交点为当基质吸力等于零时(即饱和状态下)的黏聚力和内摩擦角,由此便可

以得出土体饱和时黏聚力为 13.995 kPa,内摩擦角为 7.449°。此时,可以采用一般关系式表达花岗岩残积土抗剪强度参数与基质吸力的关系,如下式:

$$c = c_0 + 0.588S \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi_0 + 2.459(e^{\frac{S}{96.95}} - 1) \quad (4)$$

其中 c_0 和 φ_0 分别为饱和状态下花岗岩残积土的黏聚力和内摩擦角,分别为图 5(a)、图 5(b) 拟合曲线的截距。由此便可以在已知 c_0 和 φ_0 的情况下,确定不同基质吸力下土体的抗剪强度参数。

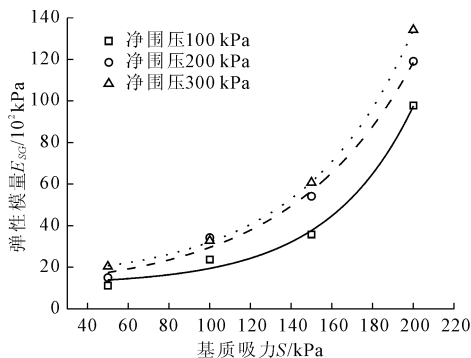


图 6 基质吸力和净围压对弹性模量的影响

分别对不同净围压下弹性模量与基质吸力的关系进行曲线拟合,得出关系式(5)、式(6)和式(7),依次对应净围压 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。

$$E_{SC} = 11.499 + 0.7460e^{0.024S} \quad (5)$$

$$E_{SC} = 8.000 + 4.2076e^{0.016S} \quad (6)$$

$$E_{SC} = 13.203 + 2.9720e^{0.019S} \quad (7)$$

各公式拟合优度都大于 0.99,说明各公式拟合精度较高,较为贴合实测值显示的规律。从试验结果来看,净围压对弹性模量的影响程度与基质吸力相比较小,仅考虑基质吸力对弹性模量的影响,忽略净围压的影响,将三种净围压下试验数据分别采用式(8)、式(9)和式(10)进行并置拟合,以求得最佳拟合效果公式,拟合结果见图 7。

$$E_{SC} = y_0 + Ae^{aS} \quad (8)$$

$$E_{SC} = e^{A+BS} \quad (9)$$

$$E_{SC} = y_0 + AS + BS^2 \quad (10)$$

式中: E_{SC} 为弹性模量; S 为基质吸力; A 、 B 、 a 和 y_0 为拟合参数。

从图 7 中可以看出,三种拟合函数均能较好的拟合试验数据,Exponential 函数拟合优度为 0.939,Exp2PMod2 函数拟合优度为 0.934,多项式函数拟合优度为 0.928,式(11)、式(12)和式(13)分别为上述三种函数拟合得出的关系式。相比较而言,Exponential 函数拟合效果稍优于另外两个函数,可

以用该公式作为弹性模量与基质吸力的关系式。

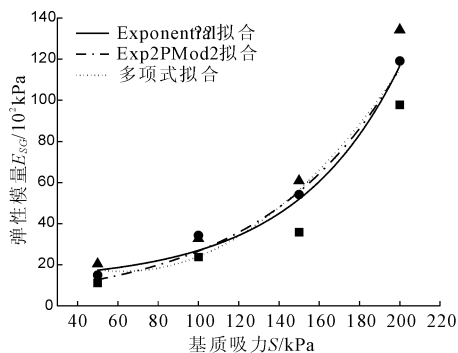


图 7 不同拟合函数的并置数据拟合曲线

$$E_{SC} = 11.374 + 2.316e^{0.019S} \quad (11)$$

$$E_{SC} = e^{1.819+0.015S} \quad (12)$$

$$E_{SC} = 37.189 - 0.652S + 0.005S^2 \quad (13)$$

对于式(11),令基质吸力等于零时,即可得到饱和状态下土的弹性模量,那么推广到一般表达式,采用饱和弹性模量 E_0 表示, E_0 为图 7 拟合曲线的截距,可得到下式:

$$E_{SC} = E_0 - 2.316 + 2.316e^{0.019S} \quad (14)$$

由此便可在已知饱和状态时土体弹性模量的情况下,确定不同基质吸力下土体的弹性模量。

3 结 论

通过非饱和三轴仪对花岗岩残积土进行抗剪强度试验研究,得出结论如下:

(1) 从应力应变曲线分析,可以发现,基质吸力和围压对花岗岩残积土偏应力的影响较大,偏应力随着基质吸力的增大而增大,且在同一净围压下,基质吸力较大时增长幅度更大。同一基质吸力下,偏应力随着净围压的增大而增大,围压的增加提高了土体抗剪强度。

(2) 基质吸力对花岗岩残积土抗剪强度参数均有影响,黏聚力随基质吸力的增大呈线性增长趋势,内摩擦角随基质吸力增大呈曲线增长趋势。基质吸力对土体弹性模量也有影响,弹模随基质吸力呈递增规律。

参考文献:

[1] Bishop A W. The principle of effective stress[J]. Lecture Delivered in Oslo, 1959,106(39):859-863.
 [2] Fredlund D G, Morgenstern N R, Wildger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Can Geotech J, 1978,15(3):313-321.

后的边坡进行数值模拟,进一步证实了改进的传递系数法在加锚边坡稳定性分析及在边坡稳定性分析中使用预应力锚索加固的准确性和可行性。

参考文献:

- [1] 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:101-104.
- [2] 杨海平.基于改进的传递系数法滑坡稳定性分析[J].水电能源科学,2013,31(5):138-139,112.
- [3] 陶志平,周德培,岳志勤.滑坡推力计算中传递系数法的改进研究[J].路基工程,2006(5):80-81.
- [4] 李波,曾亮亮,任东伟,等.某路堑高边坡稳定性评价及优化设计[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):115-121.
- [5] 张晨,王志俭,宋琨,等.滑坡稳定性计算传递系数超载法的修正[J].人民长江,2016,47(10):45-48.
- [6] 乔梁.预应力锚索在隧道洞口顺层仰坡加固中的应用研究[D].西安:西安工业大学,2018:44-51.
- [7] 庄晓莹,蔡永昌,朱合华.锚固边坡稳定性分析有限元模型及锚固效应的探讨[J].岩土工程学报,2008(7):1099-1104.
- [8] 赵晓彦,张京伍,梁瑶,等.花岗岩类土质边坡主被动组合锚固设计方法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(3):633-639.
- [9] 雷军,肖世国.考虑滑体中锚拉力扩散效应的锚固边坡稳定性分析方法[J].岩土工程学报,2019,41(9):1724-1730.
- [10] 徐邦栋,马骥.确定滑坡推力的工程地质比拟法[J].水文地质工程地质,1979(1):18-23.
- [11] 中华人民共和国国土资源部.滑坡防治工程勘查规范:DZ/T 0218—2006[S].北京:中国标准出版社,2006:20.
- [12] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [13] 李国庆.基坑支护方案选择与数值模拟研究[D].南京:南京大学,2014:32-40.
- [14] 徐祥,戴自航.岩土预应力锚固作用三维数值模拟的等效力法[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):20-25,55.
- [15] 戴明恺.高路堑边坡稳定性分析及数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2018:57-82.
- [16] 王珂,李顺群,李珊珊.Midas/GTS在边坡稳定性与地基沉降分析中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(3):362-365.
- [17] 毕小勇,闫天俊,鲁杰.Midas-GTS(SRM)在边坡二维稳定性分析中的运用[J].自然灾害学报,2015,24(1):170-176.

(上接第 23 页)

- [3] 卢肇钧.非饱和土抗剪强度的探索研究[J].中国铁道科学,1999(2):12-18.
- [4] 缪林昌,崔颖,陈可君,等.非饱和和重塑膨胀土的强度试验研究[J].岩土工程学报,2006(2):274-276.
- [5] 郑方,邵生俊,余芳涛,等.重塑黄土在不同基质吸力下的真三轴剪切试验[J].岩土力学,2020,41(S1):156-162.
- [6] 张景生.水分长期入渗诱发黄土滑坡的机理研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):64-70.
- [7] 扈胜霞,周云东,陈正汉,等.非饱和和原状黄土强度特性的试验研究[J].岩土力学,2005,26(4):660-663.
- [8] 黄志全,陈贤挺,刘丰收,等.基质吸力对小浪底水库 1#滑坡非饱和土强度影响试验研究[J].中国水运(学术版),2007(7):123-125.
- [9] 杨校辉,朱彦鹏,郭楠,等.压实度和基质吸力对土石混合填料强度变形特性的影响研究[J].岩土力学,2017,38(11):3205-3214.
- [10] 郭楠,杨校辉,陈正汉,等.基质吸力对原状非饱和和黄土强度与变形特性的影响[J].兰州理工大学学报,2017,43(6):120-125.
- [11] 闫芙蓉,胡雪源,崔芳.非饱和黄土抗剪强度特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):100-104,227.
- [12] 邓署光.非饱和和花岗岩残积土强度试验研究[J].2016,30(2):269-273.
- [13] 凌华,殷宗泽.非饱和土强度随含水量的变化[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1499-1503.
- [14] 韦锋,姚志华,陈正汉,等.结构性对非饱和 Q3 黄土强度和屈服特性的影响[J].岩土力学,2015,36(9):2551-2559.
- [15] 王静,刘寒冰,吴春利.冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J].岩土力学,2012,33(12):3665-3668,3688.